DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.160705

于淑会, 周向莉, 卿冀川, 陈子康, 郭爱请, 秦岭. 河北滨海盐碱土地生态安全评价[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(5): 778−786
Yu S H, Zhou X L, Qing J C, Chen Z K, Guo A Q, Qin L. Evaluation of ecological security of coastal saline land in Hebei[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2017, 25(5): 778−786

河北滨海盐碱土地生态安全评价*

于淑会[1,2], 周向莉[3], 卿冀川[1], 陈子康[1], 郭爱请[1], 秦 岭[1]

(1. 河北地质大学 石家庄 050031; 2. 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所 成都 610041;
3. 中国地质大学(北京) 北京 100083)

摘 要: 滨海盐碱地盐渍化较严重, 土地生态环境脆弱, 了解滨海盐碱区的土地生态安全状态, 探讨其驱动机制, 可为滨海盐碱区土地结构调整与土地功能提升提供依据。本文以河北省黄骅市为研究区域, 以土地利用类型为基础, 设计了黄骅市土地利用生态安全(LUES)分级标准, 计算得出研究时段内的 LUES 值, 阐明了黄骅市土地利用生态安全状态并探寻起主要作用的关键土地利用类型。在此基础上, 利用 2000—2010 年 TM 遥感影像数据和社会经济数据, 借助 Erdas、ArcGIS 与 Fragstats 软件平台, 选择了包括 LUES 在内 16 个指标, 构建了黄骅市 P-S-R 土地生态安全评价模型, 探讨了黄骅市土地生态安全状态。结果表明: (1)2000—2010 年间, 黄骅市 LUES 值为 0.458~0.466, 土地利用生态安全处于临界安全状态, 应控制建设用地、盐场及重度盐碱地面积; (2)黄骅市土地利用生态安全提升主要得益于土壤盐渍化的降低, 中、重度盐碱地面积减少及轻度盐碱地面积增加带来的生态正效应超过了建设用地面积增加带来的生态负效应, 这是 LUES 提高的主要原因; (3)黄骅市土地生态安全指数(LESI)呈逐年上升趋势, 安全状态由 2000 年的较不安全(LESI 为 0.431)提升至 2010 年的较安全(LESI 为 0.666)状态; (4)压力指数(P)在逐年减小, 响应指数(R)在逐年增加, 2010 年响应指数对 LESI 贡献最大, 其贡献率为 45.3%, 说明人为措施减小了土地生态风险。本研究结果可为黄骅市土地生态利用提供科学依据。

关键词: 土地生态安全; P-S-R 模型; 土地利用生态安全; 滨海盐碱地; 黄骅市
中图分类号: X171; X22 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-3990(2017)05-0778-09

Evaluation of ecological security of coastal saline land in Hebei*

YU Shuhui[1,2], ZHOU Xiangli[3], QING Jichuan[1], CHEN Zikang[1], GUO Aiqing[1], QIN Ling[1]

(1. Hebei GEO University, Shijiazhuang 050031, China; 2. Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China; 3. China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: Severe soil salinization and fragile ecological environment are characteristic features of coastal saline land. It is therefore very important to analyze the state of ecological security of coastal saline land and the driving mechanisms in order to lay the basis for structural land adjustment and land function upgrade. Based on the land use types, a classification standard of land use ecological security (LUES) in coastal saline area of Huanghua City, Hebei Province was developed. LUES values in 2000, 2005 and 2010 were calculated in Huanghua City, and key land use types were explored. Based on the above results, we selected 16 indicators (including LUES) combining with TM data and socio-economic data for 2000–2010, coupling with Erdas, ArcGIS and Fragstats platforms, to construct the P-S-R

* 石家庄市科学技术研究与发展计划项目(165790095A)和河北省社科基金项目(HB15YJ020, HB15YJ025)资助
于淑会, 主要从事土地生态安全与生态系统可持续管理研究。E-mail: yushuhui126@126.com
收稿日期: 2016-08-11 接受日期: 2016-10-24

* The study was funded by the R&D Project of Shijiazhuang Science & Technology (165790095A) and the Social Science Foundation of Hebei Province (HB15YJ020, HB15YJ025).
Corresponding author, YU Shuhui, E-mail: yushuhui126@126.com
Received Aug. 11, 2016; accepted Oct. 24, 2016

land ecological security evaluation model, and then used this model to evaluate the state of land ecological security status in Huanghua City. The results showed that: (1) LUES value for Huanghua City was 0.458–0.466 during the period of 2000–2010, LUES was at critical security state; and there was an urgent need to control the areas of construction land, salty land and heavily saline land. (2) Improvement of LUES in Huanghua City was mainly due to the decreased of soil salinization. Positive ecological effects of decrease in both moderate and severe saline land areas, and increase in lightly saline land areas exceeded the negative ecological effects of increase in construction land areas. (3) The land ecological security index (LESI) of Huanghua City showed a rising trend year by year, and the safety state improved from less secure (LESI = 0.431) in 2000 to safe (LESI = 0.666) in 2010. (4) The stress index (*P*) decreased, while the response index (*R*) increased year by year. For 2010, *R* contributed the most to LESI (45.3%), which indicated that the developed measures reduced ecological risk of land in the study area. The results provided a scientific basis for ecological utilization of land in Huanghua City.
Keywords: Land ecological security; P-S-R model; Ecological security of land use; Coastal saline land; Huanghua City

生态安全问题的提出，最早源于 20 世纪 80 年代，我国生态安全问题的提出基本始于 20 世纪 90 年代后期，主要强调生态系统的可持续性[1]。国外生态安全研究主要集中在生态健康、基因工程生物的生态安全、生态入侵风险、环境污染风险、食品安全等方面，侧重从不同角度探讨生态安全问题，关注的研究尺度多为全球或国家层面[2-5]。国内则更多地关注生态健康诊断、生态风险评价等生态安全状态的评价研究[1,6]，评价方法趋于多元化，主要包括压力-状态-响应(P-S-R，press-state-response)模型评价、属性识别模型、景观分析等方法[4,7-10]。P-S-R 模型从社会经济与环境有机统一的观点出发，表明了人与自然的相互影响，为生态安全指标构造提供了一种逻辑基础[11]，是应用较广泛的评价模型[4,8-9,12]。

土地系统作为人类生存生活的必要栖息场所，近年来土地利用结构不合理、土地生态环境恶化等问题日益凸显，随着 GLP(global land project)工作的开展，土地系统的生态安全问题已经引起了国内外学者的极大关注。孙奇奇等[13]运用主成分分析法对哈尔滨市土地生态安全状况进行分析，并设定安全阈值。杨赛明等[14]构建“自然-社会-经济”指标体系并运用数学模型评价济南市土地资源生态安全。鉴于 P-S-R 模型能够表明人类活动与环境相互影响的特点，更多学者选用 P-S-R 或改进的 P-S-R 模型展开土地生态安全的评价工作[15-17]。

土地系统的基本构成因素包括土地利用结构与功能，土地利用结构决定了土地功能，而土地利用结构又与人类活动息息相关，因此，整合土地利用与土地生态安全，分析区域土地生态安全变化，探讨土地利用变化对区域生态安全的影响，可以深入了解区域土地安全状态及驱动机制。我国已有学者在此方面进行了研究，喻锋等[18]评价了像元水平尺度的皇甫川流域生态安全，并在此基础上分析了土地利用变化与生态安全的关系；吕建树等[5]在土地利用时空变化分析的基础上，构建“隐患-状态-免疫”生态安全评价指标体系，应用改进 TOPSI 模型展开济宁市生态安全综合评价分析；南颖等[19]将土地利用类型作为指标之一，运用 P-S-R 模型评价了图们江地区的生态安全。

河北东部滨海地区处水陆交接地带，地下水埋深浅，土壤盐渍化严重，地上植被类型单一，水产养殖业对本区水环境造成一定的危害，为生态脆弱区，其土地生态安全问题尤其值得关注。本研究以河北滨海区的黄骅市为例，设计了基于土地利用类型的黄骅市土地利用生态安全(LUES)分级标准，计算得出研究时间段内的 LUES 值，并将其作为评价指标带入 P-S-R 模型展开黄骅市土地生态安全状态的评价，以期得到黄骅市土地生态安全动态变化，为滨海盐碱区域的生态安全治理提供可靠依据。

1　材料与方法

1.1　研究区概况

黄骅市位于河北省东南部，渤海湾西岸(117°05′~117°40′E，38°09′~38°39′N)，总面积22.19 万hm^2，属于海积平原，平均海拔高度1~7.5 m，地形平坦。海岸地貌是海侵又转化为海退以后逐渐形成的，属于淤泥型泥质海岸。区内地下水水质较差，大部分地区矿化度超过3 g·L^{-1}，水化学类型为Cl-Na型或Cl-Na·Mg型，土壤贫瘠，盐渍化程度高，部分地区超过3‰。土壤类型主要有黏质潮土、壤质潮土、砂壤质潮土、氯化物盐化潮土、滨海盐土和盐化沼泽土6种类型，潮土类分布面积最大，为8.88 万hm^2，是黄骅市农业用地的主要土壤类型。

1.2　数据来源与处理

1.2.1　数据来源

本研究所用数据为 2000 年、2005 年与 2010 年 3 期遥感数据与统计数据(表 1)。统计数据主要为社会经济统计数据，来自《沧州年鉴》。遥感数据来自

于 Landsat 影像(空间分辨率为 30 m)。遥感影像预处理在 ERDAS IMAGINE 9.2 软件平台支持下完成，取样方法为三次卷积(CC)，地图投影采用 UTM，大地基准与椭球体为 WGS84。

表 1 黄骅市遥感影像信息

Table 1 Remote sensing image information of Huanghua City

年份 Year	影像传感器 Image sensor	成像时间(年-月-日) Time (year-month-day)	卫星轨道 Satellite orbit	平均云量 Mean cloudiness (%)	成像质量 Image quality
2000	TM	2000-05-01	122/33	0	好 Good
2005	TM	2005-05-15	122/33	0	好 Good
2010	TM	2010-04-27	122/33	0	好 Good

1.2.2 遥感影像数据处理

1)遥感影像解译

根据我国《土地利用现状分类标准》与大量的野外实地调研，结合黄骅市土地地表覆盖特征，将黄骅市土地利用类型初步分为建设用地、沼泽地、盐场、养殖水面、水域及农用地六大类。黄骅市为滨海冲积海积平原，土地多具盐渍化特征，而盐渍化程度也是土地生态安全极其重要的指标，因此，本研究将农用地分为轻度盐碱地、中度盐碱地及重度盐碱地，黄骅市盐碱化分级及 TM 解译标志参考高会等[20]的解译标志。综上，本研究将黄骅市土地利用类型共分为建设用地、盐场、养殖水面、水域、轻度盐碱地、中度盐碱地、重度盐碱地及其他用地八大类。其中，养殖水面与水域的解译特征区别在影像结构性，具有规整方形格网状结构的水域解译为养殖水面，其他纯色部分为水域。

2)遥感数据处理

借助 ArcGIS 10.2 软件平台，利用黄骅市行政区边界矢量图对解译完成的遥感影像进行裁剪得到黄骅市土地利用类型图，并对各地类进行面积统计。

1.3 黄骅市土地生态安全评价模型构建

本研究采用应用较广泛的 P-S-R 模型展开研究区土地生态安全评价。

1.3.1 评价指标体系建立

1)评价指标的选取

P-S-R 模型从系统压力、系统状态与系统响应 3 个方面构建指标体系。压力指标指人类活动给系统造成的负荷；状态指标指生态系统及资源环境的状态；响应指标指人类应对环境问题所采取的对策与措施[19]。借鉴已有区域土地生态安全评价研究的指标体系[17,21-22]，考虑数据的可获取性，本文筛选出具有代表性的 16 个指标，构建黄骅市土地生态安全指标体系。景观指标能完整、客观地反映土地系统的安全状况[16]，因此，选取了能代表系统稳定性与连通性的边缘密度与聚集度指数作为状态指标中的 2 个指标。边缘密度是景观破碎化程度的直接反应，边缘密度值越高，系统景观破碎度越大；聚集度指数说明同类型斑块的邻近程度，聚集度指数越高，此类型用地连通性越好。土地利用生态安全(LUES)从土地利用用途的广适性及对环境的破坏程度说明了研究区在土地利用方面的安全状态，因此也作为状态指标中的 1 个指标。体系分为目标层、准则层、指标层 3 个层次，具体见表 2。

表 2 黄骅市滨海盐碱土地生态安全评价指标体系

Table 2 Evaluation indexes of the land ecological security of coastal saline land in Huanghua City

目标层 Target layer	准则层 Criterion layer	指标层(X_j) Index layer	趋向 Trend	计算公式及说明 Formula and explanation	权重(W_j) Weight
土地生态安全综合指数 Land ecological security index	压力指标(P) Press index	X_1 人口密度 Density of population (person·hm^{-2})	–	总人口/土地总面积 Total population / total land area	0.066
		X_2 城市化率 Urbanization rate (%)	–	城市人口/总人口 Urban population / total population	0.060
		X_3 经济密度 Economic density (×10^4 ¥·hm^{-2})	–	GDP/土地总面积 GDP / total land area	0.063
		X_4 人口自然增长率 Natural growth rate of population (‰)	–	(出生人数–死亡人数)/总人数 (numbers of births – numbers of deaths) / total population	0.061
		X_5 人均耕地面积 Cultivated land area per person (hm^2)	+	耕地总面积/总人口 Total cultivated land / total population	0.062
		X_6 单位耕地面积化肥施用量 Fertilizer input per cultivated area (kg·hm^{-2})		化肥施用量/耕地面积 Fertilizer input/cultivated land area	0.064
		X_7 单位耕地面积农药施用量 Pesticide input per cultivated land area (kg·hm^{-2})	–	农药施用量/耕地面积 Pesticide input / cultivated land area	0.065

续表

目标层 Target layer	准则层 Criterion layer	指标层(X_j) Index layer	趋向 Trend	计算公式及说明 Formula and explanation	权重(W_j) Weight
	状态指标(*S*) State index	X_8 边缘密度 Edge density (ED)	−	ED=$E/A\times10^6$, E 为斑块边界总长度(m), A 为景观总面积(m^2); Fragstats 软件求得。 Calculated using Fragstats software, E is total length of patch edge, A is total area of landscape.	0.064
		X_9 聚集度指数 Aggregation index (CONTAG)	+	$\mathrm{CONTAG}=\left(1+\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n}\frac{P_{ij}\ln P_{ij}}{2\ln m}\right)\times100$, m 是斑块类型总数, P_{ij} 是随即选择的两个相邻栅格细胞属于类型 i 与 j 的概率, Fragstats 软件求得。 Calculated using Fragstats software, m is number of patch, P_{ij} is probability of grid belong i and j types.	0.064
	响应指标(*R*) Response index	X_{10} 轻度盐碱地所占比重 Proportion of mild saline land (%)	+	轻度盐碱地面积/盐碱地总面积 Mild saline areas / total saline land area	0.063
		X_{11} 土地利用生态安全 Land use ecological security	+	见 1.3.1(2) Shown in 1.3.1(2)	0.065
		X_{12} 人均粮食产量 Grain yield per capita (kg·person^{-1})	+	总粮食产量/总人口 Total grain yield / total population	0.060
		X_{13} 人均 GDP GDP per capita (×10^4 ¥·person^{-1})	+	总 GDP/总人口 Total GDP / total population	0.063
		X_{14} 第三产业产值比重 Proportion of tertiary industry (%)	+	第三产业产值/区域总产值 Output value of tertiary industry / total output value	0.062
		X_{15} 农民人均纯收入 Net income per capita (¥)	+		0.060
		X_{16} 有效灌溉面积比 Rate of effective irrigation area (%)	+	有效灌溉面积/耕地面积 Effective irrigation area / cultivated land area	0.058

2)黄骅市土地利用生态安全评价

本文参考相关研究[8,16-17]及滨海盐碱地区特点，从土地用途广适性与可变更性及对土地环境破坏程度的视角出发，设计了基于土地利用类型分类的黄骅市土地利用生态安全分级标准(表 3)。为定量化研究黄骅市土地利用生态安全状态，参考南颖等[19]的分级标准，安全级别从高到低分别赋予相应的土地利用生态安全标准值($LUES_0$)(表 3)。

土地利用生态安全值(X_{11})计算公式为:

$$X_{11}=\sum_{i}^{n}\mathrm{LUES}_{0i}\times W_i \tag{1}$$

式中: LUES_{0i}为 i 安全等级的土地利用生态安全标准值，具体数值见表 3；W_i 为 i 安全等级土地面积所占权重，计算公式[23]见公式(2)。

表 3　基于土地利用类型的黄骅市土地利用生态安全分级标准

Table 3　Standard of land use ecological security value assignment of Huanghua City based on land use type

安全等级 Security level	LUES	$LUES_0$	安全状态 Security state	土地利用类型 Land use type	具体特征 Specific characteristics
I	>0.8	0.9	安全 Security	水域(除养殖水面外的其他水面) Waters (not including aquacultural water)	变为其他土地利用用途选择很多，对土地环境无影响 Change to much more other land use types, and have no effect on the land environment
II	0.6~0.8	0.7	较安全 Less security	轻度盐碱地 Mild saline land	变为其他土地利用用途选择较多，对土地环境影响较小 Change to more other land use types, and have less effect on the land environment
III	0.4~0.6	0.5	临界安全 Criticality	中度盐碱地、养殖水面 Moderate saline land, aquacultural water	变为其他土地利用用途选择有限，利用时需要采取一定措施，对土地环境产生一定的破坏性 Change to limited number of other land use types, and have a certain destructive on the land environment
IV	0.2~0.4	0.3	较不安全 Less insecurity	重度盐碱地、盐场 Severe saline land, salt pot	变为其他土地利用用途选择较少，转变用途较苦难，对土地环境产生一定的破坏性 Change to less other land use types, and have a certain destructive on the land environment
V	<0.2	0.1	不安全 Insecurity	建设用地、其他用地 Construction land, other land use	变为其他土地利用用途较难，对土地环境破坏较大 Difficult to change to other land use types, and have a great damage on the land environment

LUES 为土地利用生态安全(表 2 中的 X_{11})计算值, $LUES_0$ 为土地利用生态安全分级标准。LUES is value of land use ecological security status (index X_{11} showed in the table 2). $LUES_0$ is classification criteria of land use ecological security.

$$W_i = \frac{A_i}{\sum_{i=1}^{n} A_i} \tag{2}$$

式中: A_i 为 i 安全等级土地面积, hm^2。

1.3.2 评价指标标准化处理

采用极值法对指标进行标准化处理, 转化到[0,1]之间, 具体公式如下:

$$Z_{ij}=(X_{ij}-\min_j\{X_{ij}\})/(\max_j\{X_{ij}\}-\min_j\{X_{ij}\})$$

(X_{ij} 为正向指标) (3)

$$Z_{ij}=(\max_j\{X_{ij}\}-X_{ij})/(\max_j\{X_{ij}\}-\min_j\{X_{ij}\})$$

(X_{ij} 为负向指标) (4)

式中: Z_{ij} 表示归一化值, 即标准值; X_{ij} 为 i 年 j 指标的实际值。

1.3.3 利用均方差赋权法确定指标权重

均方差赋权法的权重是由各指标在评价指标体系中的实际数据形成的, 客观性较强。也就是说, 各指标相对权重的大小取决于在该指标下各样本数据值的相对离散程度, 若各样本在某指标下数据值的离散程度越大, 该指标的权重也越大, 反之该指标权重应越小。

j 指标权重 W_j 计算公式为:

$$W_j = \sigma_j \Big/ \sum_{j=1}^{p} \sigma_j \tag{5}$$

式中: σ_j 为 j 指标均方差, 其计算公式为:

$$\sigma_j = \sqrt{\sum_{i=1}^{n}\left(Z_{ij} - \bar{Z}_j\right)^2} \tag{6}$$

式中: Z_{ij} 表示 i 年 j 指标的标准值; $\bar{Z}_j$ 为 j 指标标准值的均值, 其计算公式为:

$$\bar{Z}_j = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} Z_{ij} \tag{7}$$

计算结果见表 2“权重”列。

1.3.4 土地生态安全指数计算与分级标准

本文利用综合指数评价法[17]计算土地生态安全指数 LESI(land ecological security index), 即将筛选出来的每一个单项参与评价的指标自身权重值与评价指标值相乘, 然后求和, 从而计算出研究区的土地生态安全指数。

其计算公式如下:

$$\mathrm{LESI}_i = \sum_{j=1}^{n} Z_{ij} \times W_j \tag{8}$$

式中: LESI_i 代表 i 年土地生态安全指数, Z_{ij} 为评价指标的标准值, W_j 为 j 指标权重值。

在 LESI 计算基础上, 借鉴已有研究结果[5,17,24], 将 LESI 由高到低分为 5 个等级, 具体等级划分及意义见表 4。

2 结果与分析

2.1 基于土地利用类型的黄骅市土地利用生态安全评价

表 5 显示 2000 年、2005 年、2010 年黄骅市土地利用生态安全值分别为 0.458、0.459、0.466, 均处于临界安全状态, 说明当前土地利用结构存在一定问题, 应控制土地用途可变更性差的Ⅳ、Ⅴ等级

表 4 黄骅市土地生态安全分级标准

Table 4 Standard for land ecological security assignment of Huanghua City

安全等级 Security level	LESI	安全状态 Security state	具体特征 Specific characteristics
I	>0.8	安全 Security	土地生态环境好, 土地系统结构完整, 用地结构合理, 受干扰后能恢复 Very good land ecological environment, integral land system structure, reasonable land use structure, easy recovery after destruction
II	0.65~0.0.8	较安全 Less security	土地生态环境较好, 土地系统结构较完整, 用地结构较合理, 受干扰后采取一定的措施能恢复 Good land ecological environment, integral land system structure, reasonable land use structure. It is necessary to take certain measures to restore after destruction
III	0.45~0.65	临界安全 Criticality	土地生态环境较差, 土地系统结构已被破坏, 用地结构不合理, 耕地质量差, 土地功能受干扰后易恶化 Bad land ecological environment, destroyed land system structure, unreasonable land use structure, poor quality of cultivated land. It is easy to deteriorate for land function after destruction
Ⅳ	0.3~0.45	较不安全 Less insecurity	土地生态环境恶劣, 土地系统结构破坏较大, 用地结构不合理, 耕地质量非常差, 盐渍化严重, 受干扰后较难恢复 Very bad land ecological environment, destructive land system structure, unreasonable land use structure, very poor quality of cultivated land, severe salinization. It is difficult to restore for land function after destruction
V	<0.3	不安全 Insecurity	土地生态环境脆弱, 土地系统结构破碎, 用地结构十分不合理, 土壤盐渍化十分严重, 受干扰后恢复十分困难 Fragile land ecological environment, fragmented land system structure, very unreasonable land use structure, severe salinization. It is very difficult to restore for land function after destruction

LESI 指土地生态安全指数。LESI is land ecological security index.

表 5　基于土地利用类型的不同年份黄骅市土地利用生态安全状态

Table 5　Land use ecological security of Huanghua City in 2000, 2005 and 2010 based on land use types

安全等级 Security level	面积 Area ($\times10^4$ hm²)			比重 Proportion (%)			土地利用生态安全(LUES) Land use ecological security		
	2000	2005	2010	2000	2005	2010	2000	2005	2010
Ⅰ	0.15	0.46	0.99	0.69	2.11	4.55	0.006	0.019	0.041
Ⅱ	8.07	7.02	8.39	37.05	32.23	38.52	0.259	0.226	0.270
Ⅲ	4.61	6.04	3.15	21.17	27.73	14.46	0.106	0.139	0.072
Ⅳ	5.04	4.07	4.33	23.14	18.69	19.88	0.069	0.056	0.060
Ⅴ	3.91	4.19	4.92	17.95	19.24	22.59	0.018	0.019	0.023
合计 Sum	21.78	21.78	21.78	100.00	100.00	100.00	0.458	0.459	0.466

区域面积。2000 年与 2005 年 LUES(土地利用生态安全)值变化不大，2010 年 LUES 值略有增加。5 个安全等级中，安全等级Ⅱ所占面积较大(面积比重为 32.23%~38.52%)，LUES 值也最高，对综合 LUES 值的贡献率超过 50%，高达 57.9%，Ⅲ、Ⅳ、Ⅴ等级 LUES 值依次减小，等级Ⅰ与Ⅴ贡献率均不超过 10%。时间尺度上看，等级Ⅰ与Ⅴ的 LUES 值逐年增大，等级Ⅱ与Ⅳ的 LUES 值呈先减小后增大趋势，等级Ⅲ呈先增大后减小趋势且其变化率最高可达 47.8%。

2.2　黄骅市土地利用动态变化

土地利用生态安全评价的基础是土地利用类型，本节分析了研究时段内黄骅市的土地利用动态变化(图 1)，找出对土地利用生态安全变化贡献较大的几种土地利用类型，从而进行针对性的调控使其向更安全的方向发展。

1)2000—2005 年间，建设用地面积增加量大于其他用地减少量从而导致不安全等级土地的面积增加；重度盐碱地面积的减少量远大于盐场的增加量，因此这 5 年间较不安全等级面积是减少的；养殖水面面积与中度盐碱地面积均有所增加导致临界安全面积的增加；隶属较安全等级的轻度盐碱地面积是减少的；隶属安全等级的水域面积是增加的。总体来讲，虽然建设用地面积增加(1.12 万 hm^2)，但总 LUES 值因重度盐碱地面积减少(1.35 万 hm^2)的抵消作用变化不大。

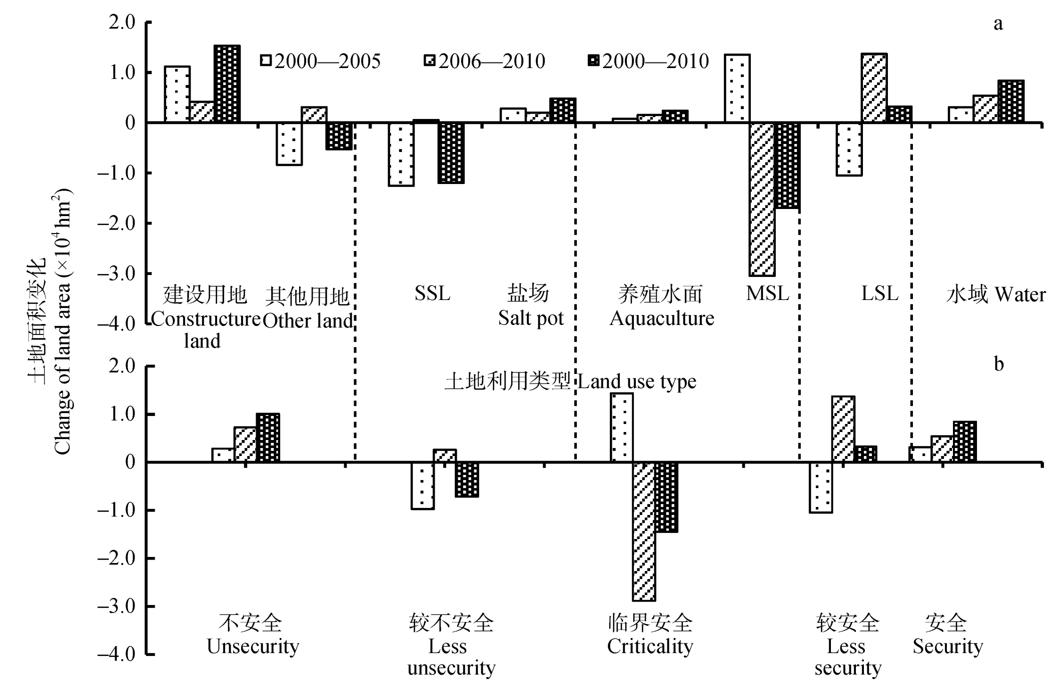


图 1　2000—2010 年黄骅市土地利用动态变化(a)及其对应的土地利用生态安全变化(b)(LSL：轻度盐碱地；MSL：中度盐碱地；SSL：重度盐碱地)

Fig. 1　Dynamic changes of land use in Huanghua City (a) and its corresponding land use ecological security change (b) from 2000 to 2010 (LSL: light saline land; MSL: moderate saline land; SSL: severe saline land)

2)2005—2010 年间，建设用地与其他用地面积均增加，因而不安全等级面积增加；重度盐碱地面积与盐场面积略有增加导致较不安全等级面积的小幅增加；中度盐碱地面积的大幅减少是临界安全等级土地面积减少的主要原因；轻度盐碱地、水域面积增加，因此较安全、安全等级面积是增加的。总的来看，轻度盐碱地面积增加(1.37 万 hm^2)缓冲了不安全与较不安全等级面积增加(0.99 万 hm^2)带来的生态安全风险，而中度盐碱地面积的大幅减少(3.05 万 hm^2)更在一定程度上提升了黄骅市的土地利用生态安全。

3)从 2000—2010 年 10 年的时间尺度来看，除因重度盐碱地大面积减少带来的较不安全等级面积减少外，其他土地利用变化规律与 2006—2010 年基本一致。10 年间，建设用地面积一直处于增加态势，而中、重度盐碱地面积的减少是黄骅市土地利用生态安全提升的关键因素。

2000—2010 年期间，随着我国经济的发展与城市化规模的扩大，黄骅市建设用地面积在逐年增加，这不利于土地的多用途利用，会减小土地的利用潜力，因此，未来应控制建设用地面积。盐碱地作为重要的后备耕地资源，通过科学的技术手段进行治理后，沧州滨海地区的盐渍化得到很大程度地降低，大大提高了土地的生态利用性。总体而言，土壤盐渍化降低带来的生态正效应超过了建设用地增加带来的生态负效应，黄骅市土地利用生态安全逐年增加。

2.3 基于 P-S-R 模型的黄骅市土地生态安全综合评价

基于 P-S-R 模型的黄骅市土地生态安全综合评价结果见表 6。总体上看，2000—2010 年间黄骅市土地生态安全指数是逐年上升的，安全等级由 2000 年的等级Ⅳ(较不安全)提高至 2010 年的等级Ⅱ(较安全)。P-S-R 模型中，“压力”(P)表征人类活动对土地系统可持续发展产生的负面影响，“状态”(S)表征可持续发展过程中土地系统存在的状态，“响应”(R)表征人类为促进土地可持续发展所采取的措施。2000 年 3 个准则层的安全指数依次为 $P>S>R$，2005 年依次为 $P>R>S$，2010 年依次为 $R>S>P$，可以看出，压力在逐年减小，响应在逐年增加，到 2010 年响应指数已超过压力指数，说明人类已意识到人为活动对生态环境的破坏并采取积极措施去减轻、恢复或预防人类活动对环境的负面影响，从而减小土地生态风险。

表 6 2000 年、2005 年和 2010 年黄骅市土地生态安全指数计算结果

Table 6 Calculation of land ecological security indexes (LESI) in 2000, 2005 and 2010 in Huanghua City

	2000	2005	2010
压力指数 Press index	0.317	0.302	0.172
状态指数 State index	0.077	0.072	0.192
响应指数 Response index	0.037	0.109	0.302
土地生态安全指数 Land ecological security index	0.431	0.483	0.666

3 结论与讨论

3.1 结论

1)总体上 2000—2010 年间黄骅市土地利用生态安全处于临界安全状态，应控制土地用途可变更性差的Ⅳ和Ⅴ等级区域面积；安全等级Ⅱ土地面积超过 30%，其对土地利用生态安全(LUES)贡献率超过 50%，是研究区土地利用为临界安全状态的关键，其他等级贡献率依次为Ⅲ>Ⅳ>Ⅴ≈Ⅰ。

2)黄骅市土地利用生态安全提升主要得益于土壤盐渍化的降低，中、重度盐碱地面积减少及轻度盐碱地面积增加带来的生态正效应超过了建设用地面积增加带来的生态负效应。2000—2005 年间，虽建设用地面积增加，但总 LUES 因重度盐碱地面积减少的抵消作用变化不大；2006—2010 年间，轻度盐碱地面积增加缓冲了建设用地及重度盐碱地面积增加带来的生态安全风险，而中度盐碱地面积的大幅减少在一定程度上提升了黄骅市的土地利用生态安全。

3)黄骅市土地生态安全指数(LESI)呈逐年上升趋势，安全等级由 2000 年的等级Ⅳ(较不安全)提高至 2010 年的等级Ⅱ(较安全)。时间尺度上看，压力指数 P 在逐年减小，响应指数 R 在逐年增加，2010 年响应指数对 ESI 贡献最大，其贡献率为 45.3%，说明人为措施减小了土地生态风险。

3.2 问题与展望

3.2.1 未来可引入生态系统服务价值量，进一步完善 P-S-R 评价指标体系

本文依据黄骅市盐渍化重的特点将盐碱地按照盐渍化程度细分为轻度、中度及重度盐碱地，结合建设用地等 5 种常见土地利用类型，将黄骅市土地利用分为 8 种类型，并赋予不同土地利用类型以相应的生态安全级别，量化得到土地利用生态安全值(LUES)，并将此作为评价指标带入 P-S-R 模型，完善了 P-S-R 模型的指标体系。但因本文意在突出盐碱土地生态安全状况，文中农用地总体划分为轻度、中度及重度盐碱地，没有细化为耕地、园地、林地等基本农用地类型。而耕地、园地、林地的植被覆盖率与持水量等生态功能是有差异的，从土地

生态系统服务角度来讲, 这 3 类土地利用类型的生态安全性是不一致的。生态系统服务价值是表征生态系统为人类提供生态福祉的指标, 因此, 可以尝试从生态系统服务层面展开土地生态安全的分析。国内外也有相关方面的研究, 何玲等[25]已通过计算生态系统服务价值核算黄骅市生态安全底线, 认为 2081 年黄骅生态安全将会达到底线 42.44 亿元, 但仅考虑土地生态系统服务, 仅能说明土地为人类提供的福祉, 不能定量分析人类活动对土地系统的生态负效应及人类对修复生态系统所做工作的正向效应。因此, 本研究接下来将把生态系统服务价值作为表征生态状态的指标, 以期进一步完善 P-S-R 模型的指标体系, 得到更加科学合理的土地生态安全评估结果。

3.2.2　基于土地利用格局优化的土地生态安全提升

通过本文的分析, 认为黄骅市土地利用生态安全的提升主要得益于中、重度盐碱地面积的降低, 即黄骅市土壤盐渍化程度的降低。黄骅市因濒临渤海湾, 地下水含盐量高且埋深浅导致较严重的土壤盐渍化, 通过明沟排水、暗管改碱等水利工程措施降低地下水位、延长毛细管上升路径从而减轻了土壤盐渍化[26], 但黄骅市濒临渤海的位置特点决定了其土壤很难达到非盐渍化的状态[27], 因此, 未来要从减轻土壤盐渍化状态的角度提升黄骅市土地生态安全是很难实现的。在这一前提下, 结合研究区水资源与土地资源特点, 高效利用地下咸水资源与降水资源提升植被覆盖度与土地利用率及农作物产量将是提升黄骅市土地生态安全的较好途径。牛君仿等[28]从优化农田管理农艺措施、生物措施、水利工程措施等方面总结了咸水安全利用农田调控的技术措施; 张喜英等[29]研究了环渤海低平原农田多水源高效利用的机理与技术, 综述了挖掘咸水利用潜力、提高水资源高效利用的一些具体措施, 并针对冬小麦夏玉米水分利用做了较细致的研究; 孔晓乐等[30]研究认为采用外来调水和浅层地下水、坑糖水混合灌溉可以显著提高咸淡水的利用率。以上研究可为黄骅市水资源的高效合理利用提供技术参考, 在此基础上可开展基于水土耦合的黄骅市土地利用格局优化研究, 从优化土地利用格局的角度提高其土地生态安全。

参考文献　References

[1] 陈星, 周成虎. 生态安全: 国内外研究综述[J]. 地理科学进展, 2005, 24(6): 8–20
Chen X, Zhou C H. Review of the studies on ecological security[J]. Progress in Geography, 2005, 24(6): 8–20

[2] Rapport D J, Costanza R, McMichael A J. Assessing ecosystem health[J]. Trends in Ecology & Evolution, 1998, 13(10): 397–402

[3] Tran L T, Knight C, O'Neill R V, et al. Fuzzy decision analysis for integrated environmental vulnerability assessment of the Mid-Atlantic region[J]. Environmental Management, 2002, 29(6): 845–859

[4] Hughey K F D, Cullen R, Kerr G N, et al. Application of the pressure-state-response framework to perceptions reporting of the state of the New Zealand environment[J]. Journal of Environmental Management, 2004, 70(1): 85–93

[5] 吕建树, 吴泉源, 张祖陆, 等. 基于 RS 和 GIS 的济宁市土地利用变化及生态安全研究[J]. 地理科学, 2012, 32(8): 928–935
Lv J S, Wu Q Y, Zhang Z L, et al. Land use change and ecological security assessment in Jining City based on RS and GIS[J]. Scientia Geographica Sinica, 2012, 32(8): 928–935

[6] 陈辉, 刘劲松, 曹宇, 等. 生态风险评价研究进展[J]. 生态学报, 2006, 26(5): 1558–1566
Chen H, Liu J S, Cao Y, et al. Progresses of ecological risk assessment[J]. Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(5): 1558–1566

[7] 吴开亚, 张礼兵, 金菊良, 等. 基于属性识别模型的巢湖流域生态安全评价[J]. 生态学杂志, 2007, 26(5): 759–764
Wu K Y, Zhang L B, Jin J L, et al. Ecological security evaluation of Chaohu Lake basin based on attribute recognition model[J]. Chinese Journal of Ecology, 2007, 26(5): 759–764

[8] 魏兴萍. 基于 PSR 模型的三峡库区重庆段生态安全动态评价[J]. 地理科学进展, 2010, 29(9): 1095–1099
Wei X P. Ecological safety evaluation of Three Gorges Reservoir area in Chongqing with the pressure-state-response model[J]. Progress in Geography, 2010, 29(9): 1095–1099

[9] 解雪峰, 吴涛, 肖翠, 等. 基于PSR模型的东阳江流域生态安全评价[J]. 资源科学, 2014, 36(8): 1702–1711
Xie X F, Wu T, Xiao C, et al. Ecological security assessment of the Dongyang River watershed using PSR modeling[J]. Resources Science, 2014, 36(8): 1702–1711

[10] 李绥, 石铁矛, 付士磊, 等. 南充城市扩展中的景观生态安全格局[J]. 应用生态学报, 2011, 22(3): 734–740
Li S, Shi T M, Fu S L, et al. Landscape ecological security pattern during urban expansion of Nanchong City[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2011, 22(3): 734–740

[11] 肖笃宁, 陈文波, 郭福良. 论生态安全的基本概念和研究内容[J]. 应用生态学报, 2002, 13(3): 354–358
Xiao D N, Chen W B, Guo F L. On the basic concepts and contents of ecological security[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2002, 13(3): 354–358

[12] 王根绪, 程国栋, 钱鞠. 生态安全评价研究中的若干问题[J]. 应用生态学报, 2003, 14(9): 1551–1556
Wang G X, Cheng G D, Qian J. Several problems in ecological security assessment research[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2003, 14(9): 1551–1556

[13] 孙奇奇, 宋戈, 齐美玲. 基于主成分分析的哈尔滨市土地生态安全评价[J]. 水土保持研究, 2012, 19(1): 234–238
Sun Q Q, Song G, Qi M L. Analysis of land ecological safety

evaluation of Harbin City based on principal component analysis[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2012, 19(1): 234–238

[14] 杨赛明, 徐跃通, 张邦花. 区域土地资源可持续利用的生态安全评价[J]. 中国人口·资源与环境, 2010, 20(S3): 325–328
Yang S M, Xu Y T, Zhang B H. Evaluation on ecological security of regionally sustainable utilization of land resources[J]. China Population, Resources and Environment, 2010, 20(S3): 325–328

[15] 刘勇. 区域土地资源可持续利用的生态安全评价研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2004
Liu Y. Studies on ecological security evaluation of regional sustainable land use[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2004

[16] 张利, 陈影, 王树涛, 等. 滨海快速城市化地区土地生态安全评价与预警——以曹妃甸新区为例[J]. 应用生态学报, 2015, 26(8): 2445–2454
Zhang L, Chen Y, Wang S T, et al. Assessment and early warning of land ecological security in rapidly urbanizing coastal area: A case study of Caofeidian new district, Hebei, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, 26(8): 2445–2454

[17] 杨春红, 张正栋, 田楠楠, 等. 基于P-S-R模型的汕头市土地生态安全评价[J]. 水土保持研究, 2012, 19(3): 209–214
Yang C H, Zhang Z D, Tian N N, et al. Evaluation on land ecological security in Shantou based on P-S-R model[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2012, 19(3): 209–214

[18] 喻锋, 李晓兵, 王宏, 等. 皇甫川流域土地利用变化与生态安全评价[J]. 地理学报, 2006, 61(6): 645–653
Yu F, Li X B, Wang H, et al. Land use change and eco-security assessment of Huangfuchuan watershed[J]. Acta Geographica Sinica, 2006, 61(6): 645–653

[19] 南颖, 吉喆, 冯恒栋, 等. 基于遥感和地理信息系统的图们江地区生态安全评价[J]. 生态学报, 2013, 33(15): 4790–4798
Nan Y, Ji Z, Feng H D, et al. On eco-security evaluation in the Tumen River region based on RS&GIS[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(15): 4790–4798

[20] 高会, 刘慧涛, 刘宏娟, 等. 基于改进遥感解译方法的盐碱耕地变化特征[J]. 应用生态学报, 2015, 26(4): 1016–1022
Gao H, Liu H T, Liu H J, et al. Using a modified remote sensing imagery for interpreting changes in cultivated saline-alkali land[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, 26(4): 1016–1022

[21] 卢立峰, 严力蛟. 县域土地生态安全评价——以四川省丹棱县为例[J]. 生态与农村环境学报, 2013, 29(3): 295–300
Lu L F, Yan L J. County-level land ecological security assessment: A case study of Danling County, Sichuan Province[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2013, 29(3): 295–300

[22] 苏刚, 冯菲, 张俊梅. 黄骅市耕地生态安全评价及生态阻力分析[J]. 贵州农业科学, 2015, 43(11): 179–184
Su G, Feng F, Zhang J M. Evaluation on cultivated land ecological security and ecological resistance analysis in Huanghua City[J]. Guizhou Agricultural Sciences, 2015, 43(11): 179–184

[23] 李钊, 张永福, 张景路. 干旱区绿洲县域土地利用规划中土地生态安全预测——以新疆阿瓦提县为例[J]. 水土保持研究, 2014, 21(6): 148–151
Li Z, Zhang Y F, Zhang J L. Forecast of the land ecological security at county level in the arid oasis based on planning of land utilization — a case study of awati in Xinjiang[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2014, 21(6): 148–151

[24] 谢花林. 土地利用生态安全格局研究进展[J]. 生态学报, 2008, 28(12): 6305–6311
Xie H L. Review and the outlook of land use ecological security pattern[J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(12): 6305–6311

[25] 何玲, 贾启建, 李超, 等. 基于生态系统服务价值与粮食安全的生态安全底线核算[J]. 应用生态学报, 2016, 27(1): 215–224
He L, Jia Q J, Li C, et al. Calculation on ecological security baseline based on the ecosystem services value and the food security[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, 27(1): 215–224

[26] 于淑会, 刘金铜, 刘慧涛, 等. 暗管控制排水技术在近滨海盐碱地治理中的应用研究[J]. 灌溉排水学报, 2014, 33(3): 42–46
Yu S H, Liu J T, Liu H T, et al. Application of subsurface controlled drainage for reclaiming saline-alkali soils in coastal region[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2014, 33(3): 42–46

[27] 于淑会, 白璐, 刘慧涛, 等. 河北滨海平原土壤盐分空间异质性与淋排均质化作用研究[J]. 土壤, 2014, 46(6): 1135–1141
Yu S H, Bai L, Liu H T, et al. Study on homogenizing effect to heterogeneous soil salinity in coastal plain of Hebei Province[J]. Soils, 2014, 46(6): 1135–1141

[28] 牛君仿, 冯俊霞, 路杨, 等. 咸水安全利用农田调控技术措施研究进展[J]. 中国生态农业学报, 2016, 24(8): 1005–1015
Niu J F, Feng J X, Lu Y, et al. Advances in agricultural practices for attenuating salt stress under saline water irrigation[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2016, 24(8): 1005–1015

[29] 张喜英, 刘小京, 陈素英, 等. 环渤海低平原农田多水源高效利用机理和技术研究[J]. 中国生态农业学报, 2016, 24(8): 955–1004
Zhang X Y, Liu X J, Chen S Y, et al. Efficient utilization of various water sources in farmlands in the low plain nearby Bohai Sea[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2016, 24(8): 955–1004

[30] 孔晓乐, 王仕琴, 刘丙霞, 等. 外来调水对华北低平原区地表水和地下水水化学特征的影响——以河北省南皮县为例[J]. 中国生态农业学报, 2016, 24(8): 1135–1144
Kong X L, Wang S Q, Liu B X, et al. Effect of water diversion on hydro-chemical characteristics of surface water and groundwater in lowland area of the North China Plain: A case study of Nanpi County, Hebei Province[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2016, 24(8): 1135–1144